HWR019 超导腔氦压敏感系数模拟优化

李晓丽[1,2]，徐孟鑫[1,3,*]，何源[1,3]，梁泽华[1,2]，张升学[1]，李春龙[1]，刘鲁北[1]，黄启通[3]，刘通[1]，王继宇[1]，刘国昌[1,2]，王知[3,4]，蒋天才[1]，向平安[3]，王志军[1,3]，杨阳阳[1]

（1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；

2. 中国科学院大学，北京 100049；

3. 先进能源科学与技术广东省实验室，惠州 529599

4. 广东工业大学，广州 510006）

摘要：中国加速器驱动嬗变研究装置(CiADS)的超导直线段运行在连续波模式下，4K 液氦压强波动导致超导腔体产生形变而失谐是影响低 β 腔稳定运行的重要因素。针对半波长超导谐振腔受氦压波动影响而运行不稳定的问题，以 CiADS 超导直线段 β=0.19 的半波长超导谐振腔（HWR019）为例，采用数值模拟的方法对液氦压强波动与该腔的频率变化规律进行仿真研究。通过对腔液氦接触区域、腔体的壁厚、液氦冷却流道的形状与腔体氦压敏感系数(K_{Prees})之间的关系进行计算分析，实现了将 HWR019 超导腔 K_{Press} 值降为接近 0 的目的；同时通过对腔体进行热力学计算，提供了相应的强化传热方案，有效地降低了超导腔在运行过程中的最高温度，保证了 CiADS 装置对超导腔稳定运行的需求，其分析优化方法对同类型的低 β 超导腔也具有借鉴意义。

关键词：射频超导； 半波长谐振腔； 氦压敏感系数； CiADS

中图分类号： TL53 **文献标志码：** A **doi：**

1 引言

加速器驱动嬗变研究装置（CiADS）是中国在建的重大科技基础设施装置，其原理是利用高功率质子束流打靶产生的中子驱动次临界反应堆发生核裂变反应，从而实现对长半衰期

收稿日期：2024-02-25； **修改日期：**2024-04-03

基金项目： 加速器驱动嬗变研究装置(2017-000052-75-01-000590)

作者简介：李晓丽（1999-），女（汉族），重庆市，硕士研究生，能源动力专业；E-mail: lixiaoli@impcas.ac.cn

***通信作者：** 徐孟鑫，E-mail: xumx@impcas.ac.cn

核废料的有效处置。CiADS 装置由高功率强流超导直线加速器、散裂靶和次临界反应堆组成[1]。其中超导直线加速器部分由中低 β 的半波长超导腔和中高 β 的超导椭球腔构成，能够把 5mA 的质子束流能量加速到 500MeV[2]。其中半波谐振腔包括 9 个 HWR010 超导腔、24 个 HWR019 超导腔和 60 个 HWR040 超导腔，从提高低温运行效率的角度，其运行温度选择为 4.2K[3]。同时超导直线加速段的束流损失限制指标为 0.1W/m，这对直线加速器的运行稳定性与安全性提出了极高的要求[4]。对于复杂结构的半波长超导腔，运行在 4.2K 连续波(CW)模式下仍然难以克服由于液氦压强波动、洛伦兹力和颤噪效应等因素引起的不稳定性问题[5]。

射频超导腔的带宽($\triangle f_{bw}$)定义为超导腔的特征频率(f)与有载品质因数(Q_L)的比值[6]，而超导腔的品质因数通常高于10^9，即使工作在过耦合状态下，CiADS 装置中腔体的 Q_L 值也在10^6数量级[7]，因此超导腔的带宽很窄，一般在百赫兹量级[8]。超导腔受到各种干扰因素作用而产生形变就会导致频率发生偏移，也就是超导腔失谐[9]。若失谐量较大，接近超导腔带宽时，就会造成 RF 功率馈送效率的显著下降，同时还可能导致束流的能散增大[10]，使超导腔发生运行不稳定的现象。对于工作在 CW 模式下的低 β 腔而言，洛伦兹力引起的频率失谐不随时间变化，因而氦压波动引起的频率失谐成为干扰腔体稳定运行的主要因素[11]。在超导腔运行过程中使用调谐器能够一定程度补偿氦压波动导致的频率偏移，但频繁的电机运动会导致机电共振等问题[4]。因此需要提高 HWR 射频超导腔自身的机械稳定性，降低腔体的氦压敏感系数(K_{Press})，达到在现有低温系统运行水平下，氦压波动对腔体的稳定运行不产生影响的目标。

本文针对应用于高流强超导直线加速器的低 β HWR 射频超导腔，以特征频率 f=162.5MHz、最优 β=0.19 的半波长超导谐振腔（HWR019）为例，分析氦压波动对 HWR 超导腔的影响机理，采用数值仿真软件 COMSOL6.0 对腔体特征频率受液氦影响产生变化的过程进行计算，得到液氦接触区域、腔壁厚度与氦压敏感系数(K_{Press})的关系，根据计算结果选择出合适的液氦分布区域与腔壁厚度尺寸。基于以上结果，采用合适的冷却流道形状提高腔体的机械稳定性，让 HWR 超导腔体的 K_{Press} 值小于 0.001Hz/Pa，达到在 4.2K 液氦压强波动中，总的频率变化远小于腔体带宽，仅通过提高输入功率就能实现超导腔体稳定运行的目的。同时，为避免 HWR 超导腔在运行过程中失超，本研究通过对腔体进行热力学计算，提供了相应的强化传热方案。

2 氦压波动对 HWR 超导腔的影响机理

液氦在温度为 4.2 K 的运行环境下产生的压强波动远大于进入 2K 超流状态后产生的压强波动，液氦压强作用到超导腔外表面导致腔体发生随时间变化的形变，超导腔形状的微变会引起腔体特征频率产生大于带宽的频率失谐，进而导致超导腔的运行不稳定[12]。由于 HWR 射频超导腔体的电场区与磁场区的结构刚度不同，导致腔体不同区域对氦压波动的频率反馈存在明显的差异。HWR 超导腔等效为中间开路、两端短路的 RLC 并联谐振电路，腔体的等效电路如图 1 所示，其中l为等效电感值、c为等效电容值、f为腔体的特征频率。

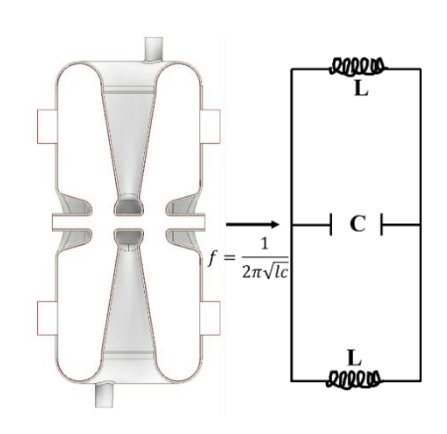


图 1 HWR 射频超导腔等效电路

在 HWR019 超导腔中，β=0.19 意味着腔体的加速间隙很小，这表明单位长度上的电容改变率会很大，由等效并联谐振电路理论可知，强电场区发生微小形变就会导致电容发生变化，进而引起频率失谐[13]，即低 β 超导腔的强电场区对氦压波动响应更为敏感，更容易导致频率发生偏移。由于液氦压强对超导腔外表面的作用力方向始终是由外指向内表面的，在强电场区氦压波动产生的形变会导致等效电路中电容的增大与频率的降低，而氦压波动作用在强磁场区产生的形变会导致等效电路中电感的减小与频率的升高，因此液氦作用在这两个区域产生的失谐效果能够相互抵消一部分，最终频率失谐量大小仍需定量计算分析。

通过上述分析可知，氦压波动对 HWR 射频超导腔的影响程度主要取决于腔体不同区域对氦压波动响应的强弱程度以及腔体自身的结构强度。表征超导腔体对氦压波动的响应程度的参数为氦压敏感系数(K_{Press})，腔体特征频率的偏移量△f 与氦压改变量△P 成线性关系，二者的比值即为 K_{Press} [14]。

3 计算模型及设置

下图 2 为特征频率 f=162.5MHz 的 CiADS 装置 HWR019 超导腔的计算模型俯视图，在该超导腔的两个端部分别有两个清洗口，四个支撑板对称分布在束流口方向的腔体两侧，两个耦合口与束流管垂直对称分布，纹理显示部分为该腔的真空区域，通过对腔体的内壁进行抽壳得到。

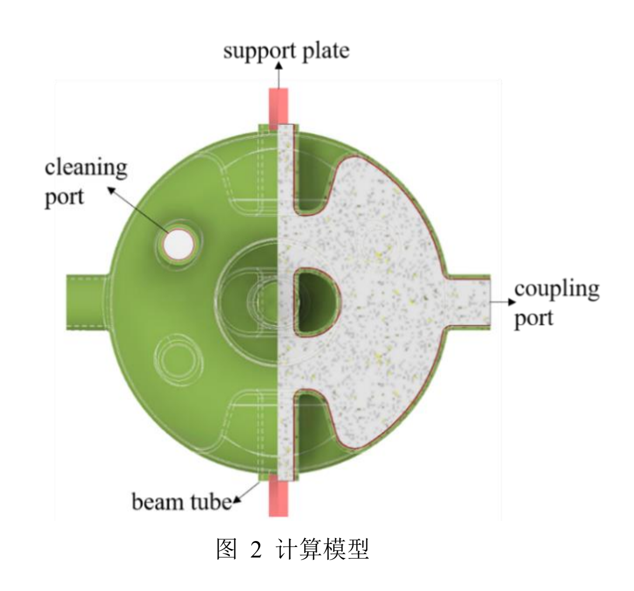


图 2 计算模型

计算边界条件的设置如图 3 所示，四个支撑板处于固定状态，束管两端添加弹性约束（刚度 K），K 值的大小根据腔体的调谐灵敏度计算得到。腔体外表面与液氦进行接触冷却，腔体内表面是洛伦兹力的作用表面。采用四面体非结构化网格对腔体模型进行离散计算，为保证仿真结果的真实可靠性，进行网格无关性验证。腔体的失谐量是由特征频率 f 计算得到的，将特征频率 f 作为观察对象，改变计算模型的最低网格限制数 M，得到 f 随 M 的变化情况图。如图 4 所示，当最低网格限制数 M 大于 140 时，腔体的特征频率得到了很好的收敛效果，故在进行网格划分时，最低网格限制数设定为 160，进而整个腔体的四面体网格数为 1200 万。网格划分、边界条件与材料参数设置完成后，对模型展开计算。

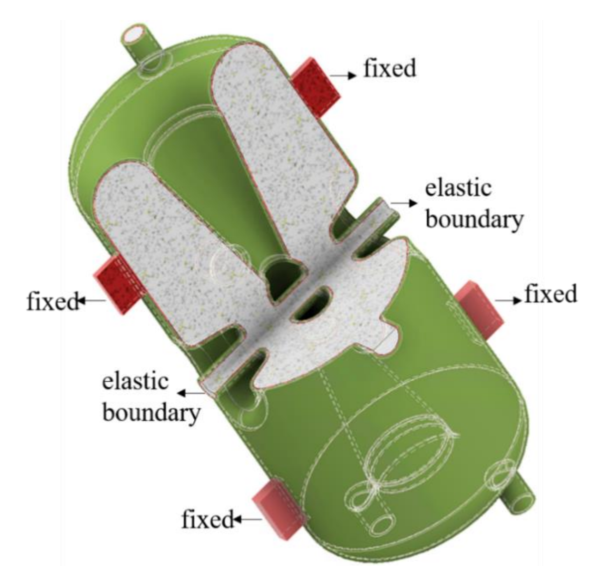


图 3 边界条件设置

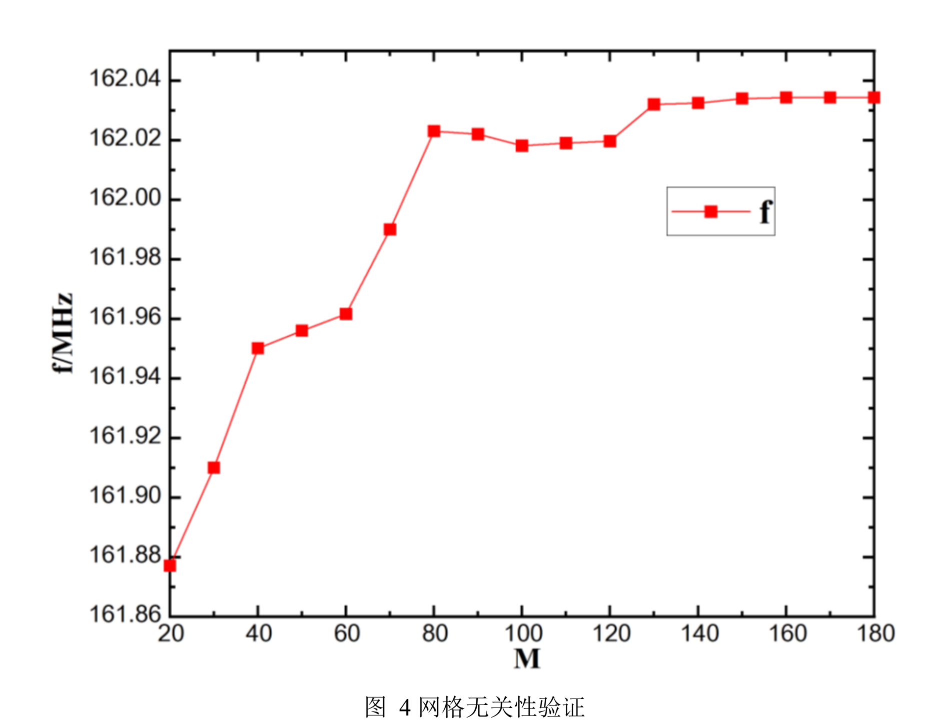


图 4 网格无关性验证

4 计算结果与分析

4.1 液氦波动对不同区域的影响

针对液氦波动对 HWR019 超导腔不同区域的影响情况，计算分析了三种常见的液氦冷却方式，即整腔浸泡冷却、仅有端部与内导体流通液氦进行冷却以及仅内导体流通液氦进行

冷却，液氦在不同区域的分布如图 5 所示。腔体不同浸没区域对氦压敏感系数系数的影响原理如下，整腔浸泡冷却即液氦覆盖了腔体的强电场区与强磁场区，端部与内导体冷却即液氦覆盖了腔体部分磁场区与电场区，仅内导体流通液氦表示液氦仅覆盖了强电场区与部分磁场区。液氦压强波动导致腔体某一微小单元面积ΔS处产生ΔV的形变量，频率改变量$\Delta f = f - f_0$（其中f为发生形变后的腔体特征频率，f_0为未发生形变时的腔体特征频率）由公式 1 计算得到：

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\frac{1}{4}\int_{\Delta V}\left(\mu_0 H_0^2 - \varepsilon_0 E_0^2\right)dv}{\frac{1}{4}\int_{V_0}\left(\mu_0 H_0^2 + \varepsilon_0 E_0^2\right)dv} \tag{1}$$

W 表示腔体未受力发生形变前腔内储存的能量，ΔW_B表示腔体发生形变之后磁场储能的改变量，即$\Delta W_B = \frac{1}{4}\int_{\Delta V}\mu H_0^2 dv$；$\Delta W_E$表示腔体发生形变之后电场储能的改变量，即$\Delta W_E = \frac{1}{4}\int_{\Delta V}\varepsilon E_0^2 dv$，则公式 1 可以简化为公式 2。

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta W_B - \Delta W_E}{W} \tag{2}$$

液氦压强变化的微扰的方向是沿着法线向超导腔内侧的，即$\Delta V > 0$，则有$\Delta W > 0$。若扰动发生在强磁场区、弱电场区，ΔW_E相对ΔW_B而言变化较小，进而$\Delta f > 0$，腔体谐振频率增大；若扰动发生在强电场区、弱磁场区，ΔW_B相对ΔW_E而言变化较小，进而有$\Delta f < 0$，得到腔体的特征频率减小。

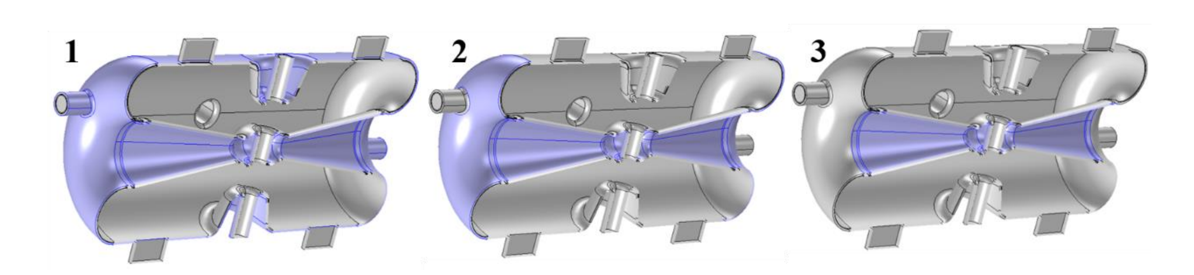


图 5 不同液氦接触面积分布情况

根据以上对原理的分析，氦压波动在电场区产生的失谐效应是使频率降低，在磁场区产生的失谐效应是让频率升高。从计算结果表 1 中可以看到，当整腔浸泡液氦时，K_{Press} 值小于零，说明该种情况下氦压波动在磁场区产生的失谐量被完全抵消，电场区对氦压波动的响应占主要；当仅端盖和内导体浸泡液氦进行冷却时，K_{Press} 值已经大于零，说明此时氦压波动作用在电场区产生的失谐量被完全抵消，氦压波动在磁场区产生的失谐占主要地位。以上两种情况表明电场区与磁场区对氦压波动的响应程度没有很好的互补，液氦压力波动会对超

导腔体稳定运行产生较大的影响。当仅有内导体接触液氦时，K_{Press} 值有了很大的降低，仅为 0.0081Hz/Pa，这表明此时氦压波动在电场区与磁场区产生的失谐量得到了很好的中和互补，氦压波动对腔体的影响程度得到了很大的改善。同时 HWR 超导腔体的主要发热区也位于内导体的强磁场区，选择仅在内导体流通液氦的方式进行冷却散热能够同时兼顾传热性能与机械稳定性。

表 1 不同液氦接触面积对应的K_P值

组别号	液氦分布情况	K_{Press}/Hz•Pa^{-1}
1	整腔浸泡	-0.0398
2	端部+内导体浸泡	0.0345
3	内导体浸泡	0.0087

4.2 腔壁厚度与 K_{Press} 的关系

HWR019 超导腔的壁厚、液氦接触区域与氦压敏感系数 K_{Press} 的关系如图 6 左图所示，其中刚度 K 为加在超导腔束流口两端的弹性约束大小，x 轴为腔壁厚度，y 轴为上一小节中研究的不同接触区域的组别号，z 轴为 K_{Press} 的值。随着腔体的厚度从 0 逐渐增加到 8mm，弹性约束刚度 K 从 5kN/mm 逐渐增大到 50kN/mm，超导腔的 K_{Press} 值呈现下降趋势。同时，当腔壁增加至 5mm 后，厚度增加导致 K_{Press} 值下降的效果在逐渐减弱，K_{Press} 的下降率在逐渐减小，腔壁厚度从 5mm 增加至 10mm 的过程中，K_{Press} 值仅下降不到 0.005Hz/Pa。基于上一节的计算结果分析，仅有内导体流通液氦进行冷却的方式对应的 K_{Press} 值应更低。图 6 右图为仅有内导体与液氦接触时，腔体壁厚与 K_{Press} 值的关系。从图中可以看到，当腔壁厚度为 5mm 时，腔体的 K_{Press} 值仅为 0.0087Hz/Pa；当腔壁厚度超过 5mm 后，氦压敏感系数几乎不随厚度增加产生变化，因此选择腔壁厚度为 5mm 能够兼顾超导腔的机械稳定性与节省成本。

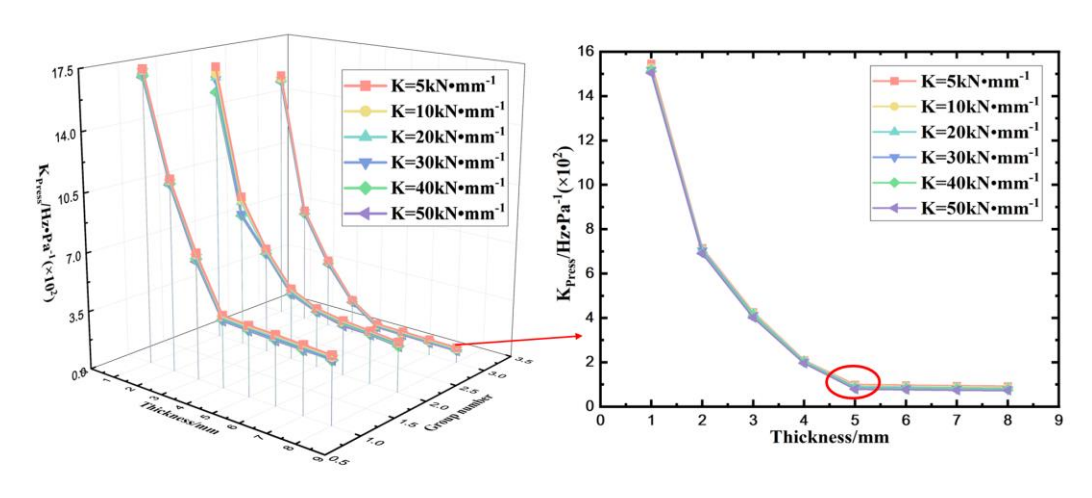


图 6 腔壁厚度与液氦接触面积对 K_{Press} 的影响

4.3 腔壁外层形状与K_P的关系

通过对以上计算结果分析，确定了该超导腔的壁厚尺寸以及冷却方式，针对厚度为 5mm 的 HWR019 超导腔，采用仅内导体流通液氦进行冷却散热，此种情况下氦压波动对腔体的影响仍然没有消除，因此进一步分析内导体外层的形状结构对 K_{Press} 值的影响。

内导体流通液氦的区域可以划分为两部分，一部分是束流管附近中间小球区域(该区域为强电场区)，另一部分是靠近端部的强磁场区域。由于中间小球区域结构较为复杂，改变该部分形状在实际加工过程中会有很大难度，且超导腔体的发热主要分布在磁场区，因此将小球区域填充为实心能够直接避免液氦与该区域接触，可以很好地降低氦压波动对强电场区的影响。对于强磁场区域的形状结构，主要选择了两种进行对比分析，一种液氦流道为圆锥体的结构，另一种是液氦流道为圆柱体的结构，如图 7 所示。计算结果如表 2 所示，采用圆柱体流道进行液氦冷却时，K_{Press} 值仅为 0.0000397Hz/Pa 远低于另外两种流道形状对应的 K_{Press} 值，这表明液氦在圆锥体结构的流道流动进行冷却时，对超导腔侧壁产生的压力形变比在圆柱体结构流动时对侧壁产生的压力形变更剧烈，圆柱体的流道可以很好地降低腔体由于氦压波动引起的失谐；同时从洛伦兹失谐系数(K_l)的变化情况可以看到，圆柱体形的流道还能够一定程度减缓洛伦兹力对腔体产生的失谐影响，因此内导体的外层结构选择圆柱体流道来冷却散热。同时研究了圆柱体孔径大小对 K_{Press} 的影响，由于超导腔电磁设计产生的尺寸限制，圆柱体流道的孔径最大值只能为 60mm，将孔径大小从 44mm 按照步长 2mm 逐渐增大到 60mm，观察不同孔径下 K_{Press} 值的大小。图 8 表明随着孔径的增加，K_{Press} 值在不断下降，这说明在孔径增加的过程中，HWR019 超导腔的等效电路中电容和电感的改变相互抵

消越来越多，因此超导腔体的特征频率失谐量越来越小，故最终内导体选择孔径为 60mm 的圆柱体形状作为液氦冷却区域，此时的 K_{Press} 值仅为 0.0000279Hz/Pa，氦压波动对 HWR019 超导腔稳定运行几乎不产生影响。

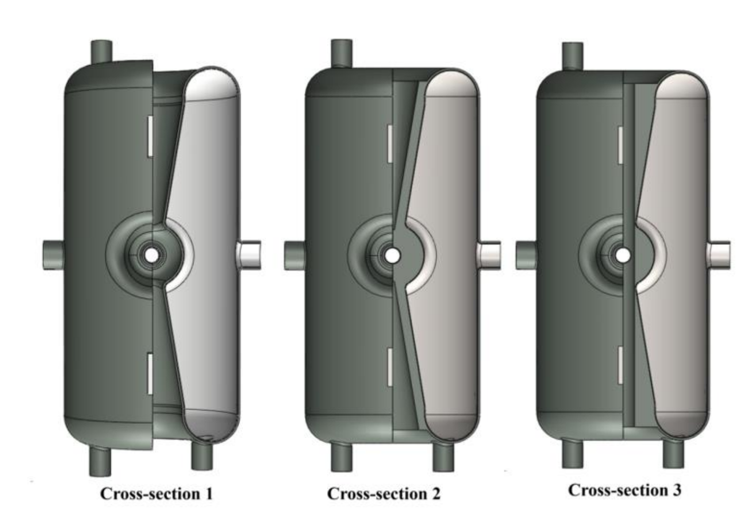


图 7 三种不同内导体形状的截面图

表 2 不同内导体形状对应的 K_{Press} 与 K_l 值

截面序号	流道结构	K_{Press}/Hz•Pa^{-1}	K_l/Hz•(MV•m^{-1})$^{-2}$
1	未改变	0.0087	-1.5229
2	圆锥体形	0.002865	-1.4084
3	圆柱体形	0.0000397	-1.3820

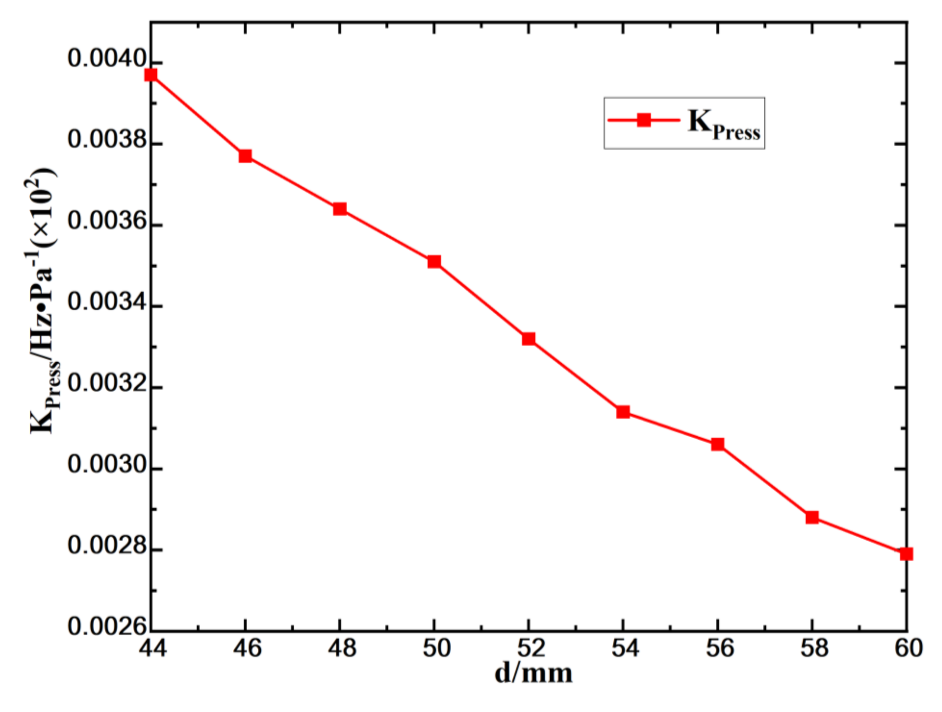


图 8 孔径大小与 K_{Press} 值的关系

4.4 腔体传热计算分析

为实现 HWR019 超导腔在 4.2K 运行时的高稳定性，腔体采用内导体局部液氦冷却的设计。由于铌腔低温下低热导率对传热的影响，需要对优化后的腔体结构进行热力计算分析，避免运行梯度热失超的发生[15]。如图 9 中 a 所示模拟了 HWR019 纯铌腔(5mm 铌层) 在运行峰值表面电场 E_{PK}=28MV/m(E_{acc}=6.7MV/m)时的温度分布情况，最高温度达到了 9.44K，超过铌的超导转变温度。可通过如下两种方案强化超导腔的传热效果：1）对腔外导体添加液氦冷却管路，强化换热过程[16]。采用 6 根均匀的液氦冷却管进行强化传热，添加冷却管道后的传热效果如图 9 中 b 所示。加速梯度为 E_{acc}=6.7MV/m 时，腔体的最高温度为 4.28K，相对没有管道冷却时最高温度下降了 5.16K，可满足腔体稳定运行的要求。2）为降低铌腔的建造成本，可采用复合腔强化冷却的方案[17]。既能减少铌材的使用，也能利用高导热的外覆材料加强冷却，如 4N 铝(RRR=104)在 4.2K 时的热导率为 240.4W/(m•K)[18]。铌铝复合腔(2mm 铌，3mm 铝)和纯铌腔的最高温度与峰值表面电场(E_{PK})的对比关系如图 10 所示。采用铌铝复合腔的方案最高温度上升幅度远小于纯铌腔，运行梯度 E_{acc}=6.7MV/m 时，铌铝复合腔的最高温度仅为 4.75K。更进一步，铌铝复合腔添加外导体管道冷却后的温度分布如图 11 所示，最高温度为 4.27K，同样满足 HWR019 腔稳定运行的要求。

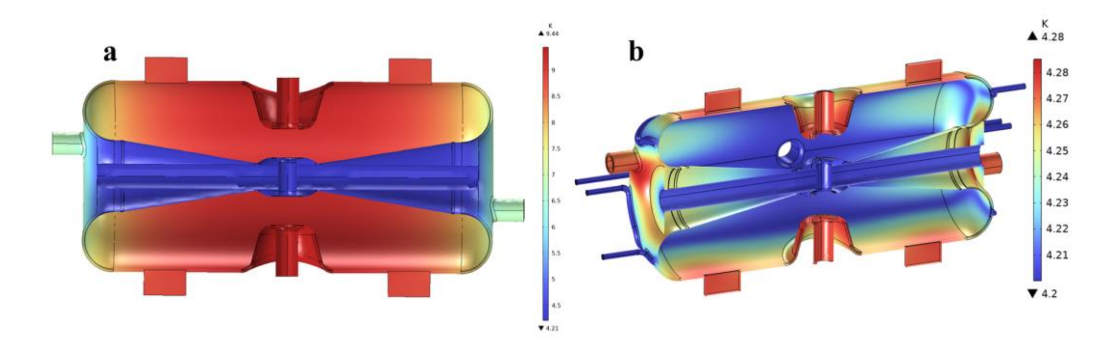


图 9 E_{PK}=28MV/m 时 HWR019 纯铌腔添加管道冷却前后的温度分布对比

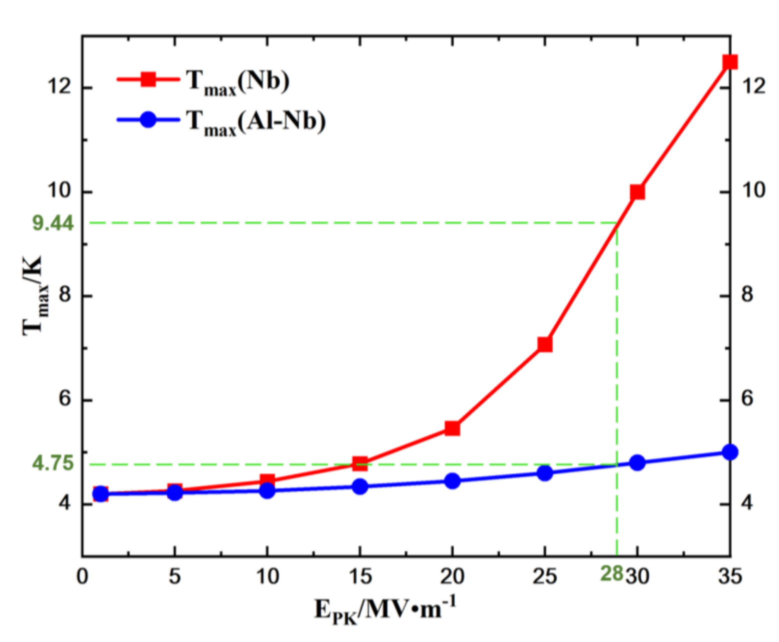


图 10 HWR019 纯铌腔与铌铝复合腔最高温度与 E_{PK} 变化关系

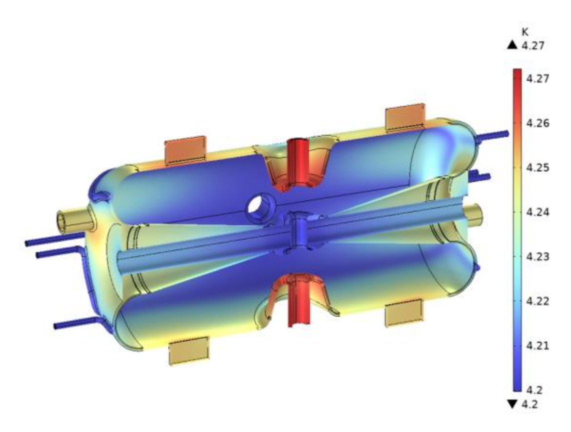


图 11 HWR019 铌铝复合腔管道冷却效果

5 结语

本文计算了 HWR019 超导腔对氦压波动的响应情况，分析了腔体不同区域对液氦压强波动的敏感程度，以及腔壁厚度对氦压敏感系数 K_{Press} 值的影响，同时优化了腔体内导体外层的形状结构，最终将 HWR019 超导腔运行在 4.2K 环境下的 K_{Press} 值降低到 0.001Hz/Pa 以下，保证了腔体的稳定运行。此外，通过热力计算分析，得到了两种冷却方案，采用管道冷却的散热方式或采用较高热导率的复合腔，均能保证腔体的稳定运行。这对同类型的低 β 超导腔的氦压敏感系数分析优化具有参考意义。

主要结论如下：

（1） 模拟了 HWR019 超导腔体各区域对氦压波动的响应程度，仿真结果表明，超导腔最终的氦压敏感系数 K_{Press} 取决于电场区与磁场区对氦压波动响应的中和程度，采用整腔浸泡与端盖和内导体浸泡这两种冷却方式时，磁场区与电场区产生的失谐量均得不到很好地抵消；当仅有内导体与液氦接触进行冷却时，K_{Press} 值处于较低值，且内导体的强磁场区是超导腔的主要发热区，选择该区域进行液氦冷却能够对超导腔主要发热区散热的同时具有较高机械稳定性；

（2） 计算了 HWR019 超导腔不同腔壁厚度与 K_{Press} 值关系，结果表明：随着腔壁厚度增加，K_{Press} 值逐渐下降，但当厚度增加至一定值(5mm)后，K_{Press} 值的下降率明显降低，这说明增加腔壁厚度有利于降低氦压波动的影响，但存在一个转折值，超过这一值后，通过增加厚度来降低 K_{Press} 值的效果明显减弱。因此选择该值作为腔壁厚度尺寸能够兼顾超导腔的传热效果与机械稳定性能；

（3） 研究了不同内导体外层形状与 K_{Press} 值的关系，结果表明液氦波动在圆柱体流道内引起腔体的失谐量比在圆锥体流道内引起的失谐量更低，这说明圆柱体形状的结构在抵抗液氦侧面压力时比圆锥体形状的结构强度更高；同时由于磁场区形变导致的失谐量与电场区形变导致的失谐量能够相互抵消一部分，因此在外层形状为圆柱体流道结构下，K_{Press} 值随圆柱体流道孔径的增大而降低。

（4） 通过对 HWR 超导腔进行热力计算，结果表明，纯铌腔采用外导体添加液氦管道进行强化散热，能够有效降低腔体温度，在运行加速梯度下，最高温度仅为 4.28K；考虑到成本因素，采用较高热导率的铌铝复合腔与管道冷却相结合，也能将腔体最高温度降低到 4.27K。以上两种方案均能保证超导腔在运行过程中不产生热失超。

参考文献（References）

[1] LIU S H, WANG Z J, JIA H, *et al.* Physics design of the CIADS 25MeV demo facility [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 843: 11-7. doi: https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.10.055

[2] WANG Z J, WANG F F, HUANG G R, *et al.* The Status of CiADS Superconducting LINAC, IPAC2019[C]. Melbourne, Australia, 2019:994-997. doi: 10.18429/JACOW-IPAC2019-MOPTS059

[3] XU M X, GUO H, HE Y, *et al.* CiADS and HIAF Superconducting Cavity Development Status and the Transition to Production Stage [Z]. JACoW SRF2021 (2022) MOPCAV008. doi: 10.18429/JACoW-SRF2021-MOPCAV008

[4] MA Jin Ying. Study on the Ponderomotive and Microphonics instability of the Superconducting cavities [D]; Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022:55(in Chinese)
(马瑾颖. Ponderomotive 和 Microphonics 效应对超导腔稳定性影响的研究 [D];中国科学院大学近代物理研究所, 2022:55)

[5] AMBERG M, AULENBACHER K, BUSCH M, *et al.* STRUCTURAL MECHANICAL ANALYSIS OF SUPERCONDUCTING CH CAVITIES [C]. Proceedings of SRF 2011, Chicago, IL USA , 2011:35.

[6] LIU Nai Quan, LIN Yu Zheng, LIU Guo Zhi, *et al.* Accelerator Theory[M]. Beijing, Tsinghua University Press, 2004: 162-168(in Chinese)
(刘乃泉. 加速器理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:162-168)

[7] PADAMSEE H, KNOBLOCH J, HAYS T, *et al.* RF Superconductivity for Accelerators [J]. Physics Today, 1999, 52(7): 54. doi: 10.1063/1.882759

[8] HE Shou Bo. Study of Mechanical Stability and Frequency Tuning for Low beta Superconducting Half-wave Resonator in High Intensity Proton Linac for China ADS [D]; Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014:48-51(in Chinese)
(贺守波. ADS 强流质子加速器低β超导 HWR 腔结构稳定性分析与调谐研究 [D]; 中国科学院大学近代物理研究所, 2014:48-51)

[9] GE Ming Qi, ZHAO Sheng Chu. Lorentz Force Detuning Analysis of 700MHz Single-cell Superconducting Cavity[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2005(04):413-417(in Chinese)
(葛明骐 赵升初. 700MHz 单 cell 超导腔洛伦兹力失谐分析 [J]. 高能物理与核物理, 2005(04): 413-417)

[10] FU Shi Nian, FANG Shou Xian, GUAN Xia Ling, *et al.* The Key Physics and Technology Issues in the Intense-beam Proton Accelerators[R]. China Nuclear Science and Technology Report, CNNC-0003, 2001.06.15(in Chinese)
(傅世年，强流质子加速器物理与技术关键问题，中国核科技报告，2001.06.15)

[11] YUE Wei Ming. Research on the key technologies of the Taper type half wavelength superconducting resonator[D]; Lanzhou University, 2021:36-39(in Chinese)
(岳伟明. Taper 型半波长超导谐振腔关键技术研究 [D]; 兰州大学, 2021:36-39)

[12] GASSOT H. Mechanical Stability of the RF superconducting Cavities [C]. Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, 2002: 2235-2237.

[13] POSEN S, LIEPE M. Mechanical optimization of superconducting cavities in continuous wave operation [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2012, 15(2): 022002. doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.15.022002

[14] LI Bo, LIU Hua Chang, WANG Yun, *et al.* Detuning Analysis of the Superconducting Elliptical Cavity for CSNS-II Linac[J]. Nuclear Physics Review, 2020, 37(2): 186-190(in Chinese). doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020013

(李波，刘华昌，王云. CSNS-II 超导椭球腔失谐研究 [J]. 原子核物理评论, 2020, 37(2): 186-190. doi: 10.11804/NuclPhysRev.37.2020013)

[15] MA Yan Wei. Superconducting Materials Science and Technology[M]. Beijing: Science Press, 2022(in Chineses)

(马衍伟. 超导材料科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2022)

[16] BALLANTINI R, CHINCARINI A, GEMME G, *et al.* Pipe cooling perspectives for superconducting accelerating cavities [J]. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 2003, 6(8): 083201. doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.6.083201

[17] XU M X, GUO H, HE Y, *et al.* Status and Challenges of Nb/Cu SRF Cavities for Superconducting Linac [R]. Proceedings of the 31st International Linear Accelerator Conference, England, 2022.

[18] ZHANG A L, LI Y X. Thermal Conductivity of Aluminum Alloys—A Review [J]. Materials, 2023, 16: 2972. doi: https://doi.org/10.3390/ma16082972

Simulation and optimization of helium pressure sensitivity coefficient in the HWR019 superconducting cavity

Xiaoli Li[1,2], Mengxin Xu[1,3,*], Yuan He[1,3], Zehua Liang[1,2], Shengxue Zhang[1] , Chunlong Li[1], Lubei Liu[1], Qitong Huang[3], Tong Liu[1], Jiyu Wang[1] , Guochang Liu[1,2] , Zhi wang[3,4], Tiancai Jiang[1], Pinan Xiang[3], Zhijun Wang[1,3], Yangyang Yang[1]

[1] *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China*

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China*

[3] *Advanced Energy Science and Technology Guangdong Laboratory, Huizhou, 529599, China*

[4] *School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou, 510006, China*

Abstract: For the superconducting linac section of the Chinese Accelerator Driven Transmutation Research facility (CiADS) operating in continuous wave (CW) mode, the effect of cavity detuning caused by fluctuations of liquid helium pressure is an important factors for stable operation of low β cavities. Aiming at the phenomenon of unstable operation of half-wave superconducting resonators affected by helium pressure fluctuations, and taking the half-wave superconducting resonator with a frequency of 162.5 MHz and an optimal beta of 0.19(HWR019) applied in CiADS superconducting linac section as an example, the fluctuation of liquid helium pressure and the frequency variation law of the cavity was simulated with the method of numerical simulation. By calculating and analyzing the relationship between the contact area of liquid helium in the cavity, the wall thickness of the cavity, the shape of the liquid helium cooling channel, and the helium pressure sensitivity coefficient (K_P) of the cavity, the goal of reducing the (K_P) value of the HWR019 superconducting cavity to close to 0 was achieved, which effectively ensures the stable operation of the superconducting cavity in CiADS. At the same time, by conducting thermodynamic calculations on the cavity, corresponding enhanced heat transfer schemes were provided, effectively reducing the maximum temperature of the superconducting cavity during operation. The analysis and optimization methods also have reference significance for the same type of low β superconducting cavities.

Key words： Radio-frequency superconducting; Half-wave resonator; Helium pressure sensitivity coefficient; CiADS

Received date: 25 Feb. 2024; Revised date: 3 Apr. 2024

Foundation item: China initiative Accelerator Driven System (2017-000052-75-01-000590)

Biography: Li Xiaoli(1999–), female, Chongqing, Mater, majoring in energy and power; E-mail: lixiaoli@impcas.ac.cn

***Corresponding author:** XU Mengxin, E-mail: xumx@impcas.ac.cn